実設計に即した車載LAN

FlexRay 仕様解説

第5回（最終回）クロック同期

システムの記事
佐藤道夫

本連載の最終回として，クロック同期について解説する．FlexRayネットワークでは，接続されているノードごとにクロックを持っている．これらのノードが一つのシステムとして機能するには，クラスタとしての共通時間と時刻合わせ（同期）を行う必要がある．同期は通信準備状態（スタートアップ）で行われる．また，スタートアップ後もコミュニケーション・サイクルごとに同期補正を行うようなしくみも備えている．（編集部）

本稿では，クロック同期について説明します．

分散制御方式のネットワークでは，ノードごとにクロックを備えています．それぞれのクロックの同期をとりながらシステムとしての機能を果たします．FlexRayのプロトコルもこの制御方式をとっており，あるノードから送られてくる同期フレームのタイミングを観察して，各ノードが個々にクラスタ（ネットワーク・システム）と同期をとります．

また，FlexRayのメディア・アクセスはタイム・トリガ方式なので，ノードどうしのデータのやりとりは時間で管理されています．ただし，クラスタ全体で絶対的な時間が定められているわけではありません．クロック同期を用いて，各ノードがクラスタに対して時間を合わせているのです（詳細は後述）．

このように，クロック同期はFlexRayネットワーク・システムを構築するうえでとても重要です．クロック同期は電源ON後にノードがスタートアップする際に行われますが，その後で温度変動や電圧変動，クロック発生器の製造上のばらつき，経年変化などによって徐々にタイミングがそろわなくなってしまうことも考えられます．そのため，クロックの再同期のメカニズムが必要となります．

1 ノード内部の時間とクラスタの時間

図1に示すように，FlexRayの各ノード内部の時間的な構成要素はサイクル，マクロティック，マイクロティックです．

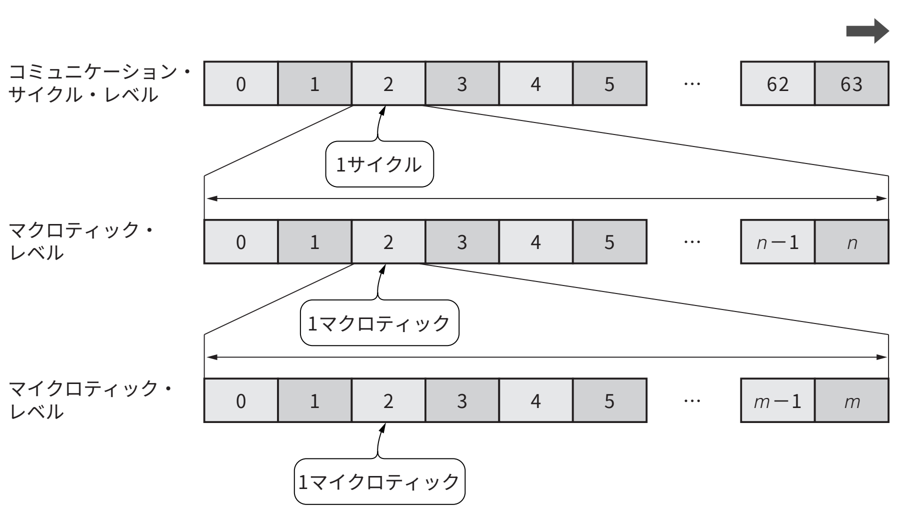


図1 タイミング階層
FlexRayの各ノード内部の時間的な構成要素は，サイクル，マクロティック，マイクロティックである．

● サイクル，マクロティック，マイクロティックの関係

マイクロティックは，FlexRayの通信コントローラのクロックによって決まる単位です．つまり，マイクロティックの長さは，ノードごとに異なるケースもあります．マイクロティックはノード内部の（ローカルな）時間の最小単位です．

マクロティックによって，各ノードの同期をとります．マクロティックの長さ（時間）は，クラスタ全体にわたって同じでなければなりません．マクロティックは整数個のマイクロティックで構成されていますが，1マクロティック当たりのマイクロティックの数は同じノード内でも異なる場合があります．

サイクルは，整数個のマクロティックから構成されます．1サイクル当たりのマクロティックの数は，一つのクラスタ内のすべてのノードで同一です．また，ある時点におけるサイクル番号は，すべてのノードで同一となります．

● 各ノードは時間についての共通な認識を持つ

先に，FlexRayプロトコルでは，クラスタとしての絶対的な（あるいは基準となる）時間は定義されないと述べました．FlexRayでは，クラスタとしての時間を「グローバル時間」，各ノードにおける時間を「ローカル時間」と呼びます．ここで，グローバル時間とは「クラスタ内の時間に関する共通認識」であり，コールドスタート・ノード（スタートアップを開始できるノード）によって与えられます．

各ノードは独立したローカル時間，すなわちノードごとのクロックに依存する時間を持っています．前回（本誌2005年11月号，pp.87-91）でもお話ししたように，スタートアップの際に各ノードがコールドスタート・ノードと統合することで，必要な情報を受信してクロック同期（ローカル時間とグローバル時間の差を認識し，補正すること）を行います．

2 補正方法と測定方法

クロック同期は，おもに二つのプロセスからなっています．これらのプロセスは並行動作します．

1）**マクロティック生成プロセス（MTG：Macrotick Gene**

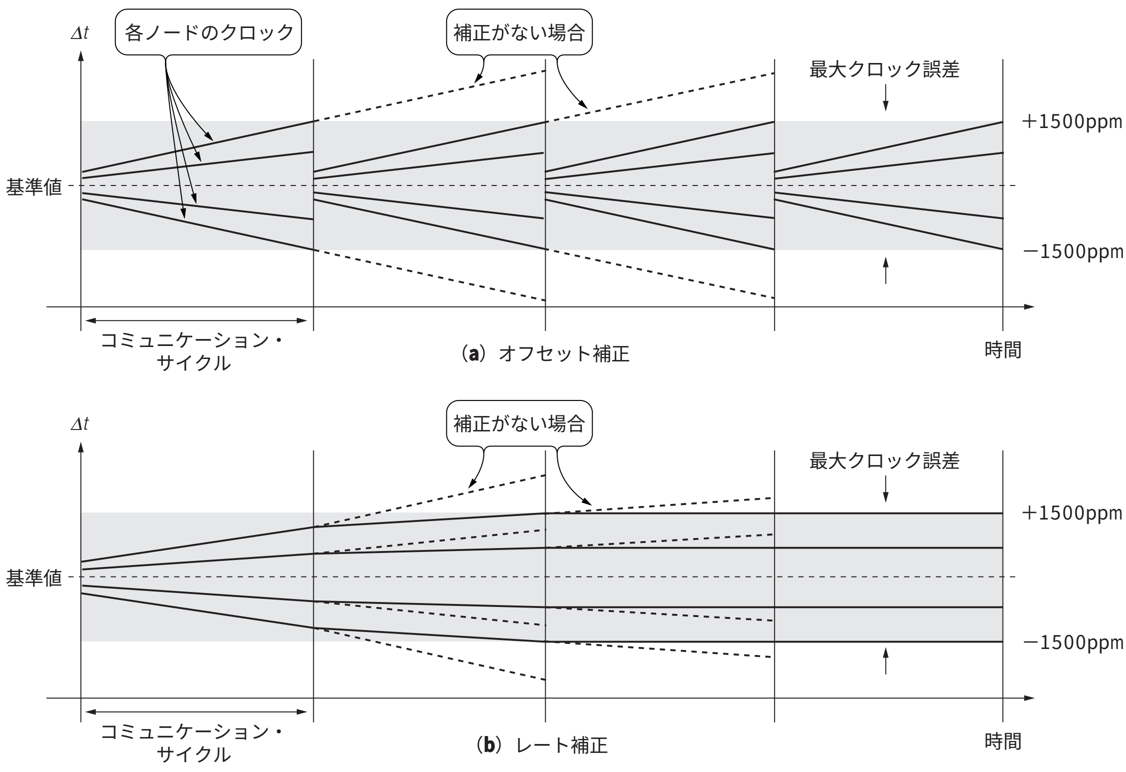


図2　クロック同期の方法

各ノードのローカル時間の同期には，オフセット（位相）補正やレート（周波数）補正を用いる方法がある．サイクルを重ねるごとに基準値（グローバル時間）からのずれは大きくなるが，補正をかけることでずれを最大誤差内に収めることができる．

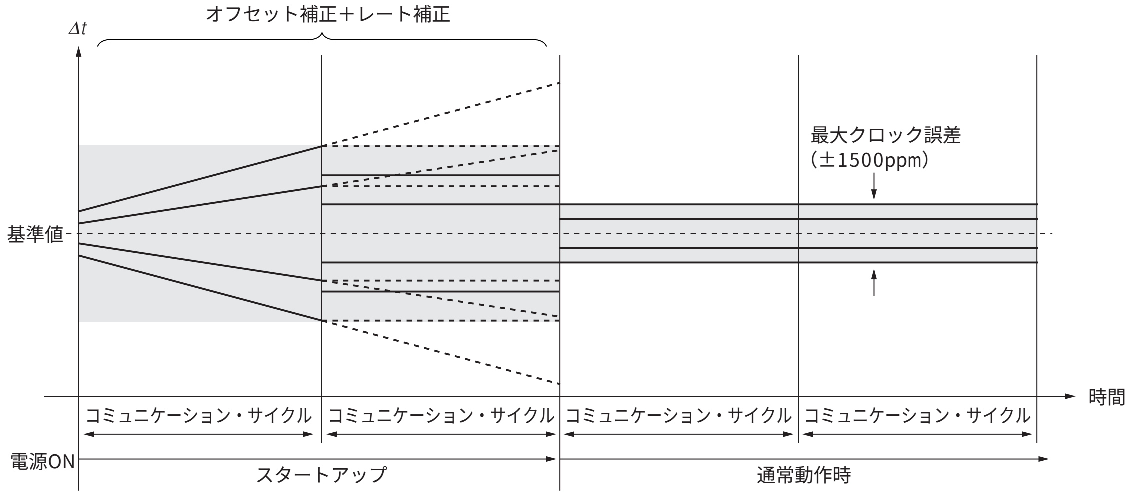


図3　FlexRayにおけるクロック同期
FlexRayでは，オフセット補正とレート補正の両方を用いてクロック同期を行っている．スタートアップで同期をとるまではクロック誤差も大きいが，同期をとった後は（すなわち通常動作時になると），最大誤差の±1500ppm内に収められる．

ration)──サイクルとマクロティックのカウンタを制御して，レート補正やオフセット補正に適用する

2) **クロック同期プロセス（CSP：Clock Synchronization Process）**──サイクル開始の際の初期化，偏差の測定と保存，オフセット補正値，レート補正値の計算を行う

これらのプロセスの初期化や開始は，CHIを介してホストから行われます．

● FlexRayでは周波数と位相の両方で補正を行う

クロック同期の大きな役割は，クラスタのクロック精度[注1]を誤差内（1500ppm；1ppmは100万分の1）に収めることです．各ノードのローカル時間の同期方法としてはオフセット（位相）補正を用いるものやレート（周波数）補正を用いるものが知られています．**図2(a)**にオフセット補正の，**図2(b)**にレート補正の動きを示します．FlexRayではこの二つを組み合わせた方法を採用しています（**図3**）．スタートアップ時に**図3**のようなクロック補正を行うことで，温度変動や電圧変動，経年変化によるタイミングのずれを最大クロック誤差内に収まるように制御しています．

図4に，FlexRayで定義されているクロック同期の補正を示します．これらの補正は，すべてのノードにおいて行われます．図からわかるように，オフセット補正値の算出はコミュニケーション・サイクルごとに行われていますが，

注1：クラスタのクロック精度とは，クラスタ内の同期している二つのノードのローカル時間の差異のこと．

実際に補正がかかるのは奇数サイクルのネットワーク・アイドル時間内のみです．このオフセット補正は，次のコミュニケーション・サイクルが開始される前に終了しておかなくてはなりません．なお，オフセット補正はマイクロティック単位で行われます．オフセット補正値に応じてネットワーク・アイドル時間が増減します．

一方，レート補正は，2サイクル（奇数，偶数サイクル）に1回，補正値が算出され，マイクロティック単位で補正されます．この補正はネットワーク・アイドル時間では行われず，次のサイクルの静的セグメントで実行されます．

● アクション・ポイントをベースに補正をかける

補正のための時間の測定は，次の手順で行います．

まず，各ノードがチャネルごとに静的セグメント内で受信したすべての同期フレームについて，予期した到着時間と実測した到着時間の差をマイクロティック単位で測定して，その値を保存します．フレームの予期した到着時間は「アクション・ポイント（または静的スロット・アクション・ポイント）」と呼ばれます（**図5**）．このアクション・ポイントに到達したとき，通信コントローラではMAC（media access control）処理が行われます．MAC処理で生成された信号をもとに，クロック同期プロセス内でタイム・スタンプがとられ，それを保存します．フレーム受信中に補助的な時間基準点が検出されると，デコーダ（通信コントローラ内のプロトコル・エンジン）がその時点での

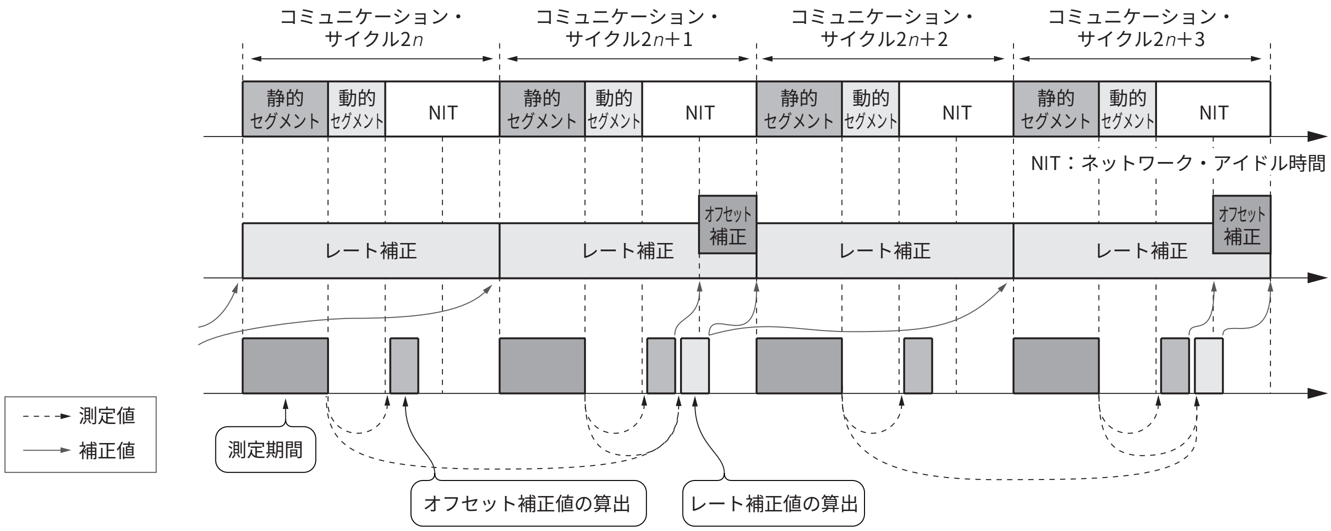


図4　クロック同期の補正

オフセット補正値の算出はコミュニケーション・サイクルごとに行われているが，実際に補正がかかるのは奇数サイクルのネットワーク・アイドル時間内のみ．一方，レート補正では，2サイクル（奇数，偶数サイクル）に1回，補正値が算出され，次に来るサイクルの静的セグメントで補正をかける．なお，この図ではオプションであるシンボル・ウィンドウは示していない．

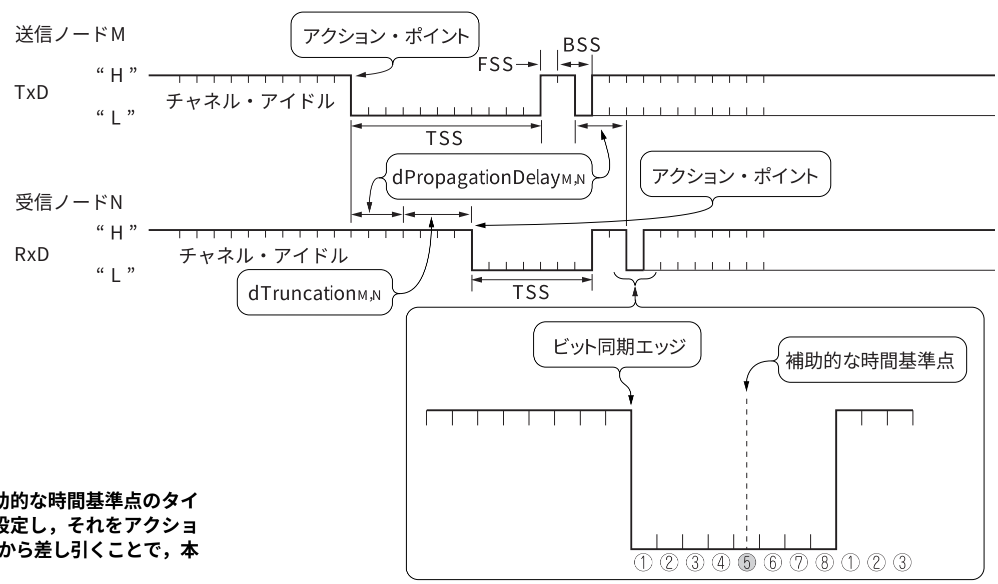


図5
フレームの時間基準点

通信コントローラ内のデコーダは，補助的な時間基準点のタイム・スタンプをもとにオフセット値を設定し，それをアクション・ポイントにおけるタイム・スタンプから差し引くことで，本来の時間基準点を求める．

タイム・スタンプをとります．

続いて，このデコーダは補助的な時間基準点のタイム・スタンプをもとにオフセット値を設定し，それをアクション・ポイントにおけるタイム・スタンプから差し引くことで本来の時間基準点を求めます．この時間測定は静的セグメントの終了とともに終了します．

また，一つのコミュニケーション・サイクル中，1チャネル当たりで受信可能な最大同期ノード数よりも多くの同期フレームを受信した場合は，そのクラスタでエラーが発生したことを意味します．すると，まずエラーの発生をホストに報告します．そして，最初に設定しておいた同期ノード数分の同期フレームだけを補正値の計算に用いるようにします．

なお，補正値の計算は通信コントローラによって次のような手順で行われます．

まず，測定したデータ数に応じたパラメータkを決めて

おきます．このkは，測定値の最大値および最小値から削除するデータの個数です．例えば，

測定値の数＝1～2のときは$k=0$
測定値の数＝3～7のときは$k=1$
測定値の数＞7のときは$k=2$

と決めたとしましょう．

このときの測定値が，かりに{－5，－3，6，8，9，11，13，15}であったとすると，測定データの個数が7以上なので，最大値から2個（この場合は15と13），最小値から2個（この場合は－5と－3）を削除します．そして，残ったデータの最大値と最小値の平均をとります．この例では(11＋6)÷2→8となります[注2]．この値は，グローバル時間に対するノードのローカル時間のずれ（偏差）の平均値を表しています．

注2：この計算に用いられるアルゴリズムは，「fault-tolerant midpoint」と呼ばれる．この方法では小数点以下は切り捨てるため，17÷2→8となる．
注3：FlexRay ver.2.1では，レート補正の許容範囲（pRateCorrectionOut）は2μT～1923μT（マイクロティック），オフセット補正の許容範囲（pOffsetCorrectionOut）は5μT～15266μTと定められている．

レート補正の場合はこの計算結果をvRateCorrection，オフセット補正の場合はvOffsetCorrectionとします．これらの値が仕様で決められている範囲[注3]を超えている場合は補正をかけます．逆に，範囲内であれば補正は行いません．

参考・引用*文献

(1) FlexRay Consortium；*FlexRay Communication System Protocol Specification Version 2.1*，May 2005.

さとう・みちお
フリースケール セミコンダクター ジャパン(株)

<筆者プロフィール>
佐藤道夫．1982年にモトローラに入社し，半導体事業部に所属．品質保証や営業を経験し，1992年からコントロール＆ネットワークのアプリケーション・エンジニアとして，ロンワークスの普及に従事する．現在は，フリースケール 技術本部 車載応用技術部において，おもに車載向けのネットワークの技術担当マネジャーしている．